

石油タンクの地震被害想定用エキスパートシステム の作成に関する研究

三 森 友 彦*
鈴 木 浩 平*

要 約

京浜工業地帯をはじめとした沿岸地域には多数の化学プラントが存在し、大型タンクに石油類、有毒ガスなどの毒物・危険物が多量に貯蔵されている。これら施設が、近い将来予想される巨大地震によって被害を受けた場合、石油類の大量流出、有毒ガスの空気中への拡散など、環境保全上非常に危険な状況となる。

このような地震被害を最小限に抑えることを目的とした、施設の損傷診断法は従来から多数発表されている。しかし、そのほとんどは複雑な力学モデルによる応答計算や、耐震設計基準の準用などによる高度な専門的技術や技法によるものであり、特にユーザとしての石油会社にとってわかりやすく、簡便な診断方法とはいえない。

本研究は、過去の地震時における平底円筒型石油タンクの損傷データを蓄積・精査してまとめた損傷モードと、その損傷状態や破損要因からなる知識ベースをもとに、タンクへの入力となる地震波のパワーや、周波数特性・地震特性・タンクのサイズなどから推論を行ない、実地震時のタンクの損傷診断をパーソナルコンピュータベースで行なう、エキスパートシステムの開発を目的としたものであり、本稿ではその基本的考え方と、いくつかの応用についてまとめている。

1. はじめに

エキスパートシステム (expert system, 以下ESと略す) とは、各分野の専門家、経験者が持っている知識や、判断の方法を収集してプログラム化した非常に多くの情報集合体からなる知識ベースを基に、推論エンジンと呼ばれるプログラムを用いて、利用者と対話しながら推論し、問題

解決のために必要な情報を選び、正しい判断のためのデータを導き出すようにしたコンピュータプログラムのことである。具体的には、病気の診断と治療法、機械などの故障診断、鉱物資源の探査などをテーマとして、1970年代から米国で開発されてきたものである。

従来、構造物や生産施設の耐震性など、安全性の評価における最終判断は、ある確定的な判定基準にもとづいて、“安全か不安全か”という二者

択一的 (binary) な査定をすることが前提とされてきた。しかし、本研究でとりあげる石油タンクなどのプラント設備や配管系など、ラインで連結された機械システムの耐震安全性をこのような方式で査定するのは実際には不可能である。この場合、個々の設備などに詳しい専門技術者 (expert engineer) の査定に委ねる方が合理的であるという考え方も根強く、実際そのような主観的判断が従来の診断法の根幹であったともいえる。

1980年に開発された構造系の地震被害査定のためのES, SPERIL (石塚, 1983) (structural perilの意) は、そのシステム構成の基礎理論を“不確定性” (uncertainty) と“あいまい性” (fuzziness) においている。ここでは、被害状態の査定に有用な情報源として、

(1) 構造・設備 (周辺を含む) の各所の目視点検によるチェックデータ。

(2) 地震前、地震震動中および地震後に得られた計測あるいは各種試験データの解析結果が主体となる。

知識が不備であった場合には、Bayesの確率論を用いても補えるが、fuzzy理論も有効に利用され、統計的データがなくても、技術者、専門家の経験や感覚にも適合した合理的判断、査定が行なえるという特徴をもつ。例えば、最終的査定の回答は、(I) 損傷なし、(II) わずかな損傷、(III) 中程度の損傷、(IV) かなりの損傷、(V) 壊滅的な損傷、(VI) 回答不可能、の6段階に分類して与えられるというものである。

本研究では、まず地震入力データベース構築の目的で、国内外の実地震波 (24波) の特性を解析し、地震波が実際の構造物に与える影響を調べるために地震応答スペクトルを求めた。

次に、写真1に示すような過去の石油タンクの地震時損傷調査を詳細に行ない、地震時の応答と損傷との関連性や、損傷モードとその要因を調べ、その損傷時の破損部分、破損様式、破損要因の関連を樹木線図 (fault tree, FT) で表わした。このFT図をもとにして、タンクが巨大地震によってうける損傷モード (災害) とその度合を診断する方法の構築を行なう。

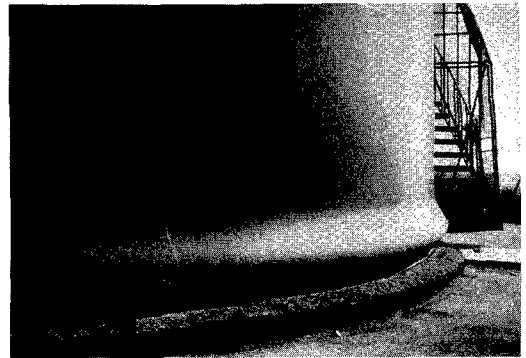


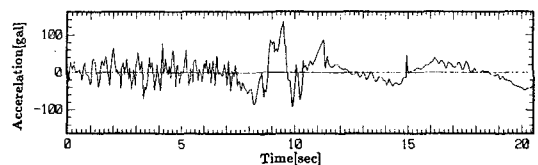
写真1 石油タンクの地震時損傷例
(側板座屈: Elephant Foot Bulging)

2 診断用入力地震動の解析と分類

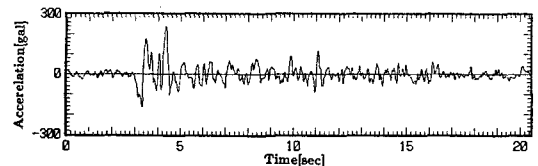
国内外における実地震波 (24波) の特性を時間領域と周波数領域で解析し、その特徴からタンクへの入力地震動の分類を行なった。そして、地震波が実際の構造物に与える影響を調べるために地震応答スペクトルを求め、それらをESのデータベースとして用いようとする。

2-1. 時間領域解析による分類

本研究で採用する実地震波は、加速度の時系列波形形で与えられており、時間刻み: 0.01 [Sec], データ点数: 2048点である。その一例を図1に示



新潟地震 (NS波)



宮城県沖地震 (EW波)

図1 加速度時系列波形

す。これももとに地震波の振幅だけに着目し、加

速度時系列の波の振幅をいくつかの階級に分け、各階級に属する振幅の数、すなわち頻度（確率密度）を図2のように求めた。ここで、確率密度分布は波の振幅を最大値について基準化して、横軸を相対振幅で表わしている。

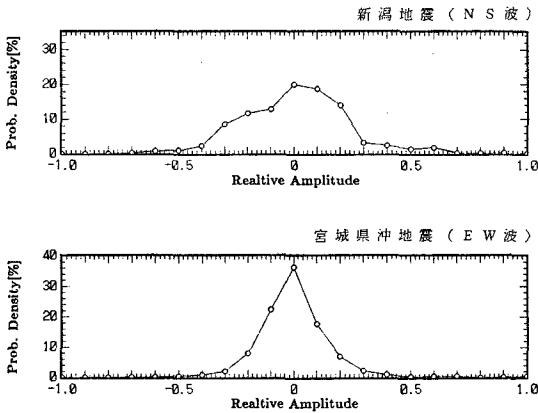


図2 振幅の確率密度分布

さらに、周波数頻度解析をゼロクロス法、ピーク法の2種類の方法によって行ない、入力波の卓越周期を把握した。

① ゼロクロス法

この方法は、波の周期性だけに着目して、地震波の曲線が横軸（ゼロ線）を横断する点の時間間隔を測り、それを2倍することによって、周期を見出す方法である。したがって、周期が非常に短く振幅の小さい、いわゆる“さざ波”（ripple）が重なっていると、これはゼロ線を横切ることがないので、周期成分として検出されない。すなわち、波が不規則であればあるほど、実際の周期とゼロクロス法による周期の頻度との間に差が生じ、短周期の波の方を見落すことになる。この方法は、周期の長い低周波数の成分をよく通し、高周波成分は通過させにくい一種の低域フィルタ（low-pass filter）ともいえる。ここで、“さざ波”の多少を表わす不規則指数を(1)式のように定義する。

$$\epsilon = \quad (1)$$

ここで、 ϵ ：不規則指数 (Irregularity index)
 N_0 ：波が正の傾斜でゼロ線を横切る点

の数

N_m ：波形の極大点（山の数）

② ピーク法

この方法は、地震波のピークとピークの間（山と山、谷と谷）の時間間隔を測り、統計的に波の持つ周期特性を見いだそうとするものである。前述のゼロクロス法と異なり、“さざ波”の山の1つ1つを周期として拾っているので、高周波のものを取り上げやすく、一種の高域フィルタ（highpass filter）といえる。図1に示した加速度時系列波形を、ゼロクロス法とピーク法で周期頻度解析を行なったものを図3、図4に示す。こ

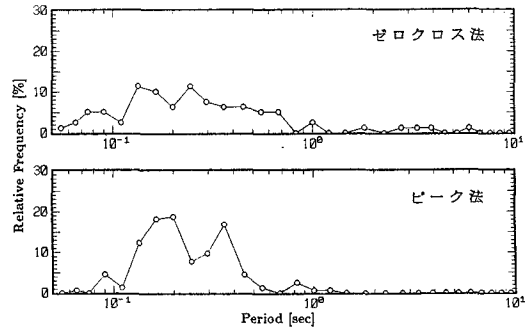


図3 周期頻度（新潟地震NS波）

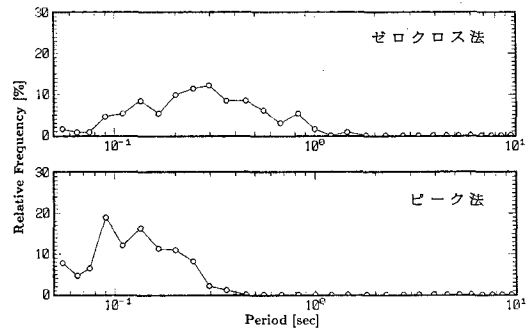


図4 周期頻度（宮城県起地震EW波）

こで、各図の上がゼロクロス法、下がピーク法で得た結果である。前述のように各図とも、ゼロクロス法は低周波寄りに、ピーク法は高周波寄りになっている。特に新潟地震（NS波）は図1からも明らかであるが、その解析結果の図3には、かなりの長周期成分が含まれていることがわかる。

また、解析を行なった24波の不規則指数と、示す。
2つの方法によって求められた最大周期を表1に

表1 周期頻度解析で求めた最大周期

地震波形ファイル名	ゼロクロス法				ピーク法	
	N。	N _m	ε	最大周期	ピーク数	最大周期
ELNS . DAT	78	124	0.78	0.845	246	0.480
ELEW . DAT	74	126	0.81	0.899	246	0.440
NIGATANS. DAT	34	78	0.90	5.784	154	1.170
NIGATAEW. DAT	34	63	0.84	4.229	123	0.900
TOKACHNS. DAT	51	126	0.91	1.696	244	0.490
TOKACHEW. DAT	46	114	0.91	2.005	218	0.640
MIYAGINS. DAT	50	168	0.95	1.347	259	0.560
MIYAGIEW. DAT	62	183	0.94	1.544	281	0.380
CHUBUNS . DAT	125	254	0.87	1.878	496	0.460
CHUBUEW . DAT	129	213	0.80	1.844	416	0.460
TAFTN21E. DAT	117	233	0.86	0.683	404	0.230
TAFTS69E. DAT	119	251	0.88	0.669	394	0.240
SANTN42E. DAT	79	157	0.86	1.253	289	0.360
SANTS48E. DAT	75	127	0.81	0.988	242	0.460
AMAGSKLG. DAT	39	70	0.83	2.162	137	0.900
AMAGSKTR. DAT	41	62	0.75	4.174	122	0.900
CALMILNS. DAT	114	247	0.89	0.578	402	0.250
CALMILEW. DAT	86	232	0.93	1.050	388	0.240
JETPS82E. DAT	126	331	0.92	0.709	389	0.200
JETPS08W. DAT	138	384	0.93	0.604	350	0.150
UNIVN29E. DAT	90	315	0.96	1.089	379	0.220
UNIVS61E. DAT	65	296	0.98	2.008	365	0.290
MANAGANS. DAT	70	121	0.82	0.860	232	0.420
MANAGAEW. DAT	67	113	0.92	0.921	218	0.460

2-2. 周波数領域解析による分類

ここでは周波数領域で入力地震波のパワースペクトルを計算し、各入力地震波はどの周波数領域のパワーが卓越しているかを調べた。

図1に示した時系列データからパワースペクトルを求め、どの周波数領域のエネルギーが強いかを調べることによって、地震波を次の3種類に分類した。

- ①比較的長周期成分のパワーが強い地震波
： 1.0以上 (1.0Hz以下)
- ②比較的中周期成分のパワーが強い地震
： 1.0~0.4。(1.0~2.5Hz)
- ③比較的短周期成分のパワーが強い地震
：. 0.4以上 (2.5Hz以上)

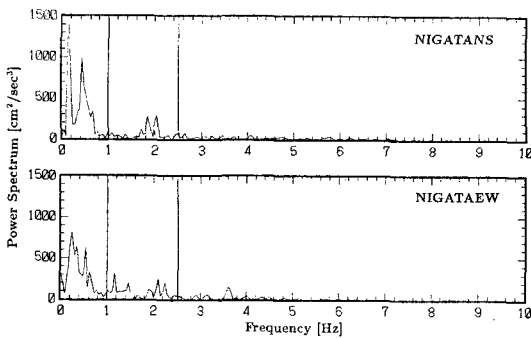


図5 新潟地震波のパワースペクトル

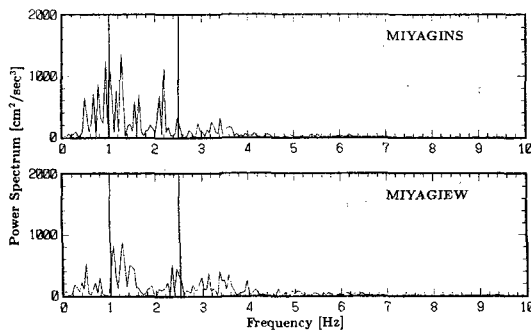


図6 宮城県沖地震波のパワースペクトル

ここで、図1に示した地震波のパワースペクトルを図5, 図6に示す。さらに上記3種類の領域にどのくらいの割合でパワーを持つのかを求めて、表2に示した。この結果から、例えば新潟地震は長周期のエネルギーが強いことなど、被害想定に用いる入力波のグローバルな特性がわかる。

2-3. 地震応答スペクトルによる分類

構造物やその部材の周期には種々なものがあり、局所的な破壊が起こるとこれらの固有周期は変化する。しかし、ある程度剛性の高い構造物では、主要な周期はおよそ0.1秒から2.5秒の間にあるものと考え、この間のエネルギーの総和を表わす積分値

$$I_h = \int_{0.1}^{2.5} S_v(h, T) dT \quad (2)$$

をもって、地震の破壊力を表わす1つの指標とすることを、ハウスナー (G.W.Housner) は提案している。(2)式において

- h: 減衰定数
- T: 固有周期
- S_v: 最大相対速度

S_v(h,T): 速度応答スペクトル

であって、I_hはスペクトル強度 (spectral intensity) と呼ばれ、図7の速度応答スペクトルにおいて、ハッチングした部分の面積に相当する。

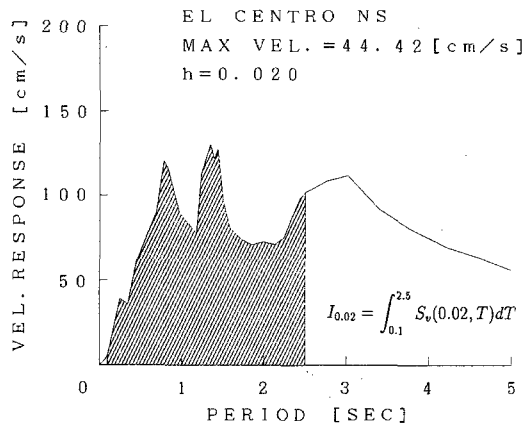


図7 スペクトル強度

表2 パワースペクトルによる周波数域分類

地震波形ファイル名	Total	Long	Middle	Short	L ---- M ---- S
ELNS . DAT	51183	0.1052	0.4489	0.4459	*
ELEW . DAT	33038	0.1991	0.4019	0.3990	*
NIGATANS. DAT	10258	0.6829	0.1827	0.1344	*
NIGATAEW. DAT	9859	0.6169	0.2546	0.1285	*
TOKACHNS. DAT	21754	0.3103	0.3583	0.3314	*
TOKACHEW. DAT	27910	0.4112	0.4071	0.1817	*
MIYAGINS. DAT	19603	0.2713	0.5228	0.2059	*
MIYAGIEW. DAT	16706	0.1335	0.4849	0.3816	*
CHUBUNS . DAT	32041	0.4418	0.2640	0.2941	*
CHUBUEW . DAT	37964	0.2214	0.3034	0.4752	*
TAFTN21E. DAT	8323	0.0167	0.1541	0.8292	*
TAFTS69E. DAT	9088	0.0212	0.1473	0.8315	*
SANTN42E. DAT	3606	0.0363	0.3812	0.5826	*
SANTS48E. DAT	4290	0.0765	0.5695	0.3540	*
AMAGSKLG. DAT	700	0.3641	0.4350	0.2001	*
AMAGSKTR. DAT	497	0.2058	0.5841	0.2101	*
CALMILNS. DAT	5831	0.0095	0.1289	0.8616	*
CALMILEW. DAT	5412	0.0428	0.2660	0.6912	*
JETPS82E. DAT	5450	0.0145	0.0951	0.8904	*
JETPS08W. DAT	2938	0.0226	0.1248	0.8526	*
UNIVN29E. DAT	1631	0.2803	0.1793	0.5404	*
UNIVS61E. DAT	2267	0.2199	0.4071	0.3730	*
MANAGANS. DAT	64311	0.0516	0.3273	0.6211	*
MANAGAEW. DAT	52712	0.0662	0.2997	0.6340	*

ここで、解析を行なった地震波の最大入力加速度 (cm/s²)、最大入力速度 (cm/s) および減衰が h =

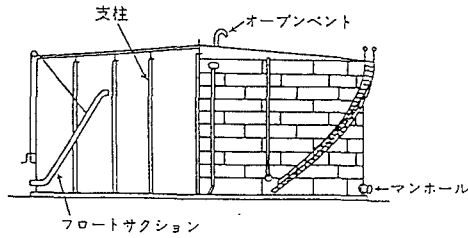
0.00, 0.01, 0.05, 0.10 のときのスペクトル強度を表3 に示す。

表3 各地震波のスペクトル強度

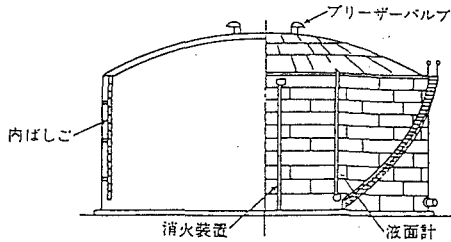
地震波形ファイル名	最大入力		スペクトル強度 (I_0)			
	Acc.	Vel.	h=0.00	h=0.01	h=0.05	h=0.10
ELNS .DAT	341.70	56.99	263.12	203.22	142.06	116.69
ELEW .DAT	210.70	54.92	242.01	179.32	118.18	93.25
NIGATANS.DAT	134.75	80.01	160.48	139.26	106.47	87.48
NIGATAEW.DAT	156.87	117.86	145.67	126.32	100.19	83.93
TOKACHNS.DAT	225.00	40.79	194.23	153.12	103.68	84.01
TOKSCHEW.DAT	182.90	42.89	259.90	213.03	151.55	120.27
TAFIN21E.DAT	152.70	9.20	53.96	39.47	28.60	24.53
TAFTS69E.DAT	175.90	8.93	58.25	45.95	34.82	29.70
SANTN42E.DAT	87.80	5.75	49.24	38.83	28.37	24.30
SANTS48E.DAT	128.60	9.72	67.85	52.78	38.42	31.76
AMAGSKLG.DAT	27.62	8.81	30.14	24.69	17.91	14.63
AMAGSKTR.DAT	35.50	13.20	27.61	20.72	13.76	11.28
CALMILNS.DAT	198.00	4.99	37.05	29.41	22.92	19.54
CALMILEW.DAT	181.60	8.88	54.41	42.40	30.38	25.86
JETPS82E.DAT	207.80	6.63	34.48	30.25	24.55	21.87
JETPS08W.DAT	139.00	4.80	31.59	26.89	20.62	17.14
UNIVN29E.DAT	56.40	9.01	59.91	50.36	36.99	29.40
UNIVS61E.DAT	83.40	9.25	63.31	56.85	40.77	33.28
MANAGANS.DAT	333.40	57.43	203.03	170.99	133.39	111.66
MANAGAEW.DAT	375.19	53.81	225.90	188.24	134.00	105.51

3 石油タンクの地震時損傷調査

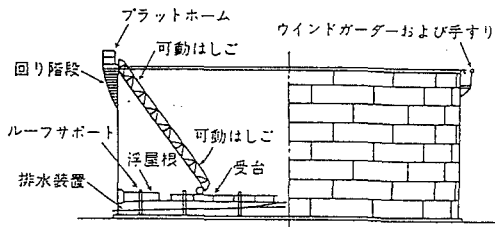
石油タンクは多様な形状のものが使用されているが、本研究では化学プラント等に多く使用されている平底円筒型のタンクを対象とした。平底円筒型石油タンクはその屋根の形式によって、図8に示すように固定円錐屋根式、固定円屋根式、浮屋根式に大別される。



(a) 円錐屋根式



(b) 円屋根式



(c) 浮屋根式

図8 平底円筒型石油タンク

石油タンクの地震時損傷診断においては、ある損傷モードに関して、その損傷が生じるときに破損する部分、各部分の破損様式、破損の生じる要因について考える必要がある。そこで国内7例、

国外8例、計15例の地震について、石油タンク損傷の詳細な調査を行ない、表4にその一例を示すようにまとめた。これをもとに作成した事業所別の被害一覧を表5、表6に示す。表中の形式の項

表5 事業所別被害一覧(新潟地震)

所在地	タンク番号	容量 (KL)	形式	内容物	直径×高さ (mm)	貯蔵量 (KL)	充填率 (%)	流出	着火
新潟市内	1101	45000	FRT	原油	62000×16500	23993	53.3	有	有
	1102	45000	FRT	原油	62000×16500	23876	53.1	有	有
	1103	30000	FRT	原油	51500×14500	27171	90.6	有	有
	1104	30000	FRT	原油	51500×14500	24934	83.1	有	有
	1105	30000	FRT	原油	51500×14500	22160	73.9	有	有
流出原因	スロッシング								
着火原因	F/R衝突、シール摩擦熱、外部火種、静電気スパーク								
破損状況	炎上、倒壊								
破損原因	スロッシング								

表6 事業所別被害一覧(宮城県沖地震)

所在地	タンク番号	容量 (KL)	形式	内容物	直径×高さ (mm)	液位 (mm)	貯蔵量 (KL)	流出
仙台市	T-217	31500	CRT	原油	43588×21855	18782	26798	有
	T-218	31500	CRT	原油	43588×21855	17434	23705	有
	T-224	23700	DRT	原油	37776×21855	16219	17644	有
流出原因	底板破損、側板破損							
破損状況	底板 ワレ 側板上部 変形 フッパ 変形 切断、引抜 フッパ板 ワレ 中部 変形 配管 切断、変形 屋根 変形 下部 変形 防油堤 破損							
破損原因	スロッシング、ロッキング、腐食							

で、FRTは浮屋根タンクを、CRTは円屋根タンク、DRTは円錐屋根タンクを示す。

タンクの致命的な損傷モードを「油の流出」として、第2章で解析、調査を行なった地震応答スペクトルをもとに、その地震時のタンクの応答と、前述した損傷との関連性について考察する。

図5から新潟地震は長周期(低周波)のパワーが卓越した地震波であり、固有周期5~6秒くらいの構造物である石油タンクに対して、かなり大きな影響を与えていることがわかる。このためタンク内容物がスロッシング現象によって流出し、浮屋根の衝突や摩擦熱を原因とする着火によって、多数の石油タンクが炎上、倒壊する大被害となった。

宮城県沖地震では、中~短周期(中~高周波)

のパワーの方が卓越していたため、スロッシングよりもロッキングによる損傷が生じている。

このように石油タンクの損傷は、地盤特性と入力地震動の周波数特性に大きく影響されることがわかる。

石油タンクの損傷様式とその直接的要因、それにより想定される二次災害をまとめると表7のようになる。

表7 石油タンクの破損様式とその要因

各部名称	破損様式	直接的要因	想定二次災害
タンク全体	崩壊	転倒モーメント	本体、接続配管の損傷による油流出
	横ずれ	ロッキング、水平力	
	傾斜、沈下	地盤液状化による破壊	
固定屋根	破損または変形	スロッシング波の衝撃圧力	破口からの溢流
浮屋根	屋根、ポツツの破損 ロッキングの脱落屈曲	浮屋根の揺動 (波動、旋回)	頂部からの溢流 浮屋根沈下
屋根支柱	支柱の座屈・横ずれ	鉛直地震力、スロッシング波	屋根の陥没
屋根ワッパ	ワッパの連結部破損	スロッシング波の衝撃	
筒結合部	破損または変形	スロッシング波の衝撃圧力	破口からの溢流
側板	上部変形...浮屋根ワッパ	浮屋根揺動による衝撃	側底部破損による油流出
	下部張出し ワッパの破損	転倒モーメントによる軸圧縮力 浮上り力、水平せん断力	
側底部	溶接止端部のみ裂	側板下部座屈、浮上り	開口部からの流出
接続配管	破損	ワッパのロッキング、横ずれ	破口からの溢流

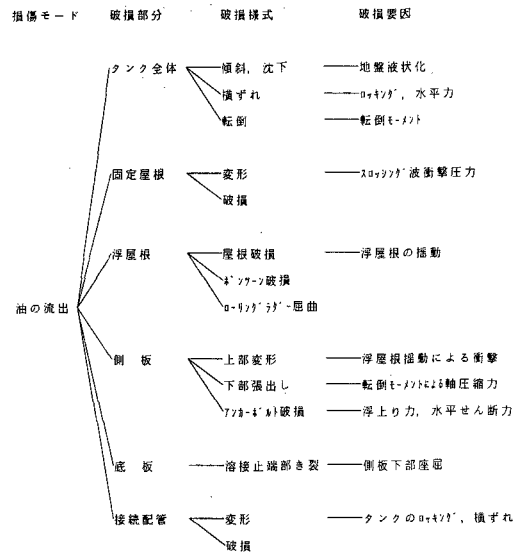


図9 損傷診断ツリー構造 (FT図)

4-1 知識ベース

知識ベースでは、図9に示した損傷モードのFT図の知識を、図10に示した構造体に格納す

石油タンクの地震時損傷診断においては、特定の損傷モードに関して、その損傷が生じるときに破損する部分、各部分の破損様式、破損要因を連鎖的に考えていく必要がある。表5、表6から最悪の損傷モードを「油の流出」とした場合の連鎖をFT図で表わすと図9のようになる。このFT図をESの知識ベースとして用いて、そのタンクが地震によって、損傷モード(災害)を発生するかどうか診断している。

4 エキスパートシステム (ES)

本研究で開発しようとするエキスパートシステムは、過去の地震時における大型石油タンクの損傷調査からまとめた損傷モードと、その破損状態や要因からなる知識ベース、地震波のパワーや周波数特性、地盤特性、タンクのサイズなどから推論を行ない、地震が発生する前に、タンクに生じる損傷を予測・診断することを目的としている。

```

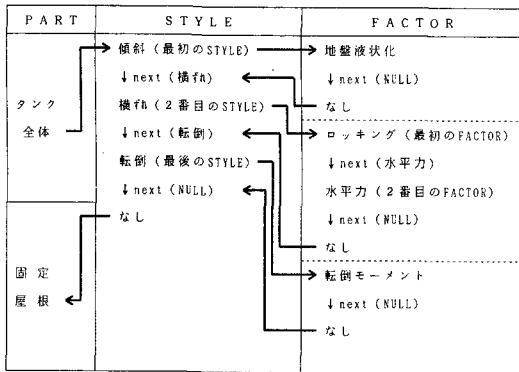
#define MAX 100
typedef struct part {
    char name[80];           破損部分名
    float prob;             確信係数
    float effect;          影響係数
    struct style *slist;    破損様式リスト
                          (最初の破損様式)
} PART;
typedef struct style {
    char s_name[80];       破損様式名
    float prob;           確信係数
    float effect;        影響係数
    struct factor *flist;  破損要因リスト
                          (最初の破損要因)
    struct style *next;   次の破損様式
} STYLE;
typedef struct factor {
    char f_name[80];      破損要因名
    float prob;          確信係数
    float effect;        影響係数
    int q_type;          質問変数
    struct factor *next; 次の破損要因
} FACTOR;
PART k_base[MAX];       知識ベース領域
    
```

図10 知識ベース構造体

る。構造体は「破損部分」、「破損様式」、「破損要因」に対応する PART, STYLE, FACTOR の3

層から成り立っている。構造体PARTは複数の構造体STYLEを持つが、その数はあらかじめ決っていないため、STYLEの数を可変にすることが必要になる。そこで、これらの構造体はリスト構造になっており、構造体PARTは、可変個のSTYLEからなる破損様式リストを持ち、構造体STYLEは、可変個のFACTORからなる破損要因リストを持っている。これらのリスト構造の関連を表8に示す。この知識ベースでは、表の矢印の

表8 リスト構造



順番にデータの入出力や、推論などの処理が行なわれる。

また、それらの構造体はその状態が発生する確率を示す「確信係数」と、1段階上のリストへの影響度を示し、得点を伝達する際の重みとなる「影響係数」とを持っている。そして、それぞれの破損要因に対して、ユーザと対応する際の質問や、データ処理の方法を示す「質問変数」を持っており、この変数を変えることにより、各種の破損要因に対応させることができる。このようにデータ形式の自由度が高いので、本研究で考察した「油の流出」という損傷モード以外の場合でも、知識ベースの構築が容易であり、汎用性の高いESの知識ベース形態であると言える。

また、この知識ベースは1段階上のリストへの影響度を示し、得点を伝達する際の重みとなる「影響係数」を持つが、その値はその部分が破損した場合に、どの程度の割合で流出が生じるかという、表9に示した流出度を考慮して決定した。

表9 破損原因と流出度

モード	原因	流出度	備考
流	屋根破損	0.3	貯蔵量によって変化
	側板破損	0.5	位置、貯蔵量によって変化
	底部破損	1.0	全貯蔵量流出
	配管破断	0.6	受入、排出中は流出度大
	スロッシング (P/R)	0.3	貯蔵量によって流出度変化
出	タンク転倒	1.0	全貯蔵量流出
	傾斜	0.1	角度によって変化
	沈下	0.3	配管破損の可能性あり
	横ズレ	0.3	配管破損の可能性あり

4-2 推論エンジン

本研究で開発したESの推論エンジンのフローチャートを図11に示す。この推論エンジンは複雑な

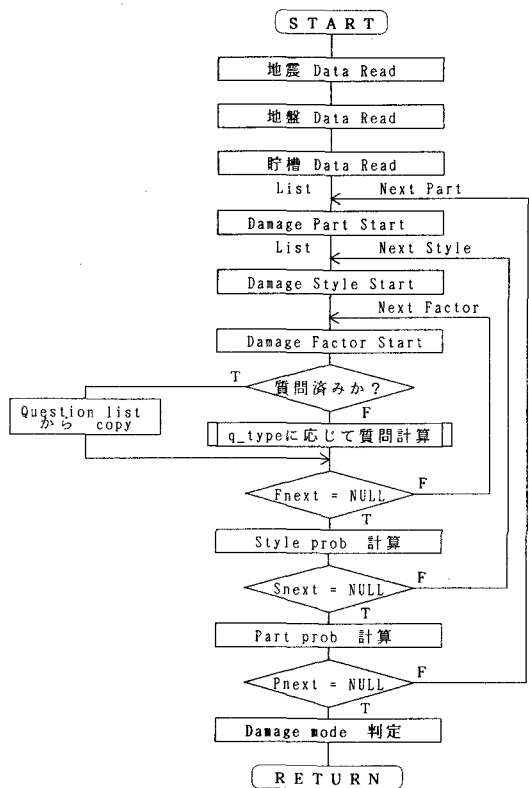


図11 推論エンジンフローチャート

応答計算を行わずに、周波数成分やパワーなどの情報からなる地震データや、地盤の特性、タンクの形状と内容物の液高といった情報から、その地震時の損傷を診断・推定するものである。推論

手順は、図11に示すように、知識ベースのすべての破損要因について順番に質問、あるいは計算・判定を行ない、各要因の確信係数を決定する。ここで、同じ破損要因の時には、質問あるいは計算などの重複を避けるようになっている。それぞれの破損要因について、質問変数によって指示された方法で確信係数が決定すると、影響係数をもとに知識ベースのリストにそって得点を伝達して、それらの破損要因をリストとして持つ破損様式の確信係数が計算される。この手順を図11のフローチャートに従って繰り返す、すべての破損部分に関する判定が終了すると、目的とする損傷モードの判定が行なわれる。

ここで、質問変数に対応する処理としては、その破損要因の確信度を、Destructive, Severe, Moderate, Slight, Noといった程度で入力する方法、タンク形状や地震波の情報から、その確信度が計算される場合などがある。

4-3 エキスパートシステム (ES)

このESの構造上最も重要な質問タイプ、つまり図11のフローチャート中の、「q-typeに応じて質問計算」の部分は次のようになっている。

q-typeは、1桁あるいは2桁の整数になっており、1桁の場合にはすべて処理を行なうが、2桁の場合で10の位が2のときは浮屋根式のタンクのみ処理を行なう。ここで、2桁の場合は、1の位の数値によって処理方法が決定される。以下にq-typeによる処理手順を示す。

(1) q-type = 1 のとき

その破損要因が発生するかどうかをYes, Noで答えて入力する。どちらかわからないときは、Grayとして入力し、その確信係数を決定する。

(2) q-type = 2 のとき

その破損要因が発生する程度(度合い)を、Destructive, Severe, Moderate, Slight, Noのいずれかで入力し、その確信係数を決定する。

(3) q-type = 3 のとき

その破損要因が、入力地震波の長周期成分による影響が大きいと考えられる場合の処理を行なう。そのときの処理は、入力地震波のデータベ-

ースから得た、長周期(低周波)部分のパワースペクトルを、地盤特性(地盤のかたさ)による影響を考慮して換算し、その値によって確信係数を決定する。ここでは、地盤が柔らかいほど、地震波の長周期成分の影響が大きくなると考えて処理を行なった。

(4) q-type = 4 のとき

その破損要因が、入力地震波の短周期成分による影響が大きいと考えられる場合の処理を行なう。ここでは、地盤が硬いほど、短周期部分の影響が大きくなると考えて処理を行なった。

(5) q-type = 5 のとき

その破損要因が、スロッシングによる影響が大きいと考えられる場合の処理を行なう。(3)式に示したタンクのスロッシング周期と地震波の卓越周期との差、およびタンクの充液率から求めた値によって確信係数を決定した。

$$\text{amp} = \{1.0 - \text{abs}(t_s - t_e) / t_s\} \times \{H_i / (H \times k)\} \quad (3)$$

ここで、 t_s : 石油タンクのスロッシング周期

t_e : 入力地震波の卓越周期

H_i : 内溶液の液高

H : 石油タンクの高さ

k : 固定屋根式のとき $k = 0.95$

浮屋根式のとき $k = 0.90$

以上の質問変数に対応した処理によって、各破損要因の確信係数が決定すると、その値と影響係数から、1段階上の破損様式の確信係数が決定される。この場合の得点の伝達は、その破損様式がリストとして持つ破損要因から伝達される値の最大値によって、確信係数が求められる。そして、各破損様式の確信係数が決定すると、その値と影響係数から、1段階上の破損部分の確信係数が決定される。この場合の得点の伝達は、その破損部分がリストとして持つ破損様式から伝達される値の合計値によって、その部分の確信係数が求められる。このようにして、すべての破損部分についての確信係数が決定されると、それらの値と影響係数から、目的とする損傷モードの判定が行なわれる。この場合の得点の伝達は、各破損部分から伝達される値の最大値によって損傷モードの確信

係数が決定され、その値によって診断を行なう。
 本ESでは、確信係数Pが次のような結果を出力するようになっている。

- 1.0 > P > 0.8 : Destructive
- 0.8 ≥ P > 0.5 : Severe
- 0.5 ≥ P > 0.2 : Moderate
- 0.2 ≥ P > 0.0 : Seight
- P = 0.0 : No

このESによる診断結果を表10、表11に示す。

表10 エキパートシステムへの入力と診断結果 (新潟地震)

エキスパートシステムへの入力 (1)

入力地震波	地盤特性	タンク屋根	直径[m]	高さ[m]	液高[m]	地盤液状化
新潟地震 NS波	Soft	浮屋根	51.5	14.5	10.8	Severe

エキスパートシステム診断結果 (1)

破損要因	結果	破損様式	結果	破損部分	結果	損傷モード
地盤液状化	Seve	傾斜 沈下	Seve Mode	タンク全体	Seve	油の流出 Seve
ロッキング	Mode	横ずれ	Slig			
水平力	Mode					
転倒モーメント	Dest	転倒	Mode			
スロッシング波衝撃圧力	PASS	変形 破損	PASS PASS	固定屋根	PASS	
浮屋根の揺動	Seve	屋根破損 スラッシュ破損 α-リブがたが-屈曲	Mode Mode Mode	浮屋根	Mode	
浮屋根揺動による衝撃	Seve	上部変形	Mode	側板	Seve	
転倒モーメントによる軸圧縮力	Dest	下部張出し	Seve			
浮上り力	Mode	720-4°斜破損	Slig			
水平せん断力	Mode					
側板下部座屈	Mode	溶接止端部き裂	Slig	底板	Slig	
タンクのロッキング	Mode	変形	Seve	接続配管	Seve	
タンクの横ずれ	Dest	破損	Mode			

ここで、Dest:Destructive, Seve:Severe, Mode:Moderate, Slig:Slight

新潟地震の実際の被害が、スロッシングの影響などによって油が流出して、浮屋根の摩擦や衝突による着火のために炎上倒壊しているのに対して、診断結果はタンク全体の傾斜や沈下、側板の破損、接続配管の破損などが特にひどく、油の流出もSevereとなっている。また宮城県沖地震の実被害は、スロッシングや、ロッキングの影響で側板や底板の破損、接続配管の破断によって、大量の

油が流出しているのに対して、診断結果は、接続配管や側板の破損が特にひどく、油の流出もSevereとなっている。これらの結果から考えて、このESの診断結果は、比較的信頼性が高いものであるといえる。

表11 エキパートシステムへの入力と診断結果 (宮城県沖地震)

エキスパートシステムへの入力 (2)

入力地震波	地盤特性	タンク屋根	直径[m]	高さ[m]	液高[m]	地盤液状化
宮城県沖地震 EW波	Hard	固定屋根	43.588	21.855	18.782	Moderate

エキスパートシステム診断結果 (2)

破損要因	結果	破損様式	結果	破損部分	結果	損傷モード
地盤液状化	Mode	傾斜 沈下	Mode Mode	タンク全体	Seve	油の流出 Seve
ロッキング	Dest	横ずれ	Mode			
水平力	Dest					
転倒モーメント	Seve	転倒	Mode			
スロッシング波衝撃圧力	Slig	変形 破損	Slig Slig	固定屋根	Slig	
浮屋根の揺動	PASS	屋根破損 スラッシュ破損 α-リブがたが-屈曲	PASS PASS PASS	浮屋根	PASS	
浮屋根揺動による衝撃	Slig	上部変形	Slig	側板	Seve	
転倒モーメントによる軸圧縮力	Seve	下部張出し	Mode			
浮上り力	Dest	720-4°斜破損	Seve			
水平せん断力	Dest					
側板下部座屈	Dest	溶接止端部き裂	Mode	底板	Mode	
タンクのロッキング	Dest	変形	Seve	接続配管	Seve	
タンクの横ずれ	Seve	破損	Mode			

ここで、Dest:Destructive, Seve:Severe, Mode:Moderate, Slig:Slight

このシステムでは、知識ベースの影響係数は過去の地震時の損傷調査から推定して、その値を決定しているが、損傷モードとその要因との関連を示すデータが大量にあれば、実際のデータから学習させて、より正確な影響係数を求めることができ、診断の信頼性も向上する。また、得点の伝達方法を最適化することで、診断精度はさらに高くなる。

また、このESでは知識ベースがリスト構造になっていて、その関係は上下方向にしか作用していないが、横方向の関連を示すことができる知識ベースと、推論エンジンが作成できれば、損傷診

断において、より有効なシステムとなる。

5 おわりに

本研究では、簡単なシステムではあるが、比較的自由度の高い知識ベースを用いた、大型石油タンクの地震時損傷診断ESを開発した。このシステムは、知識ベースの内容に依存しない推論エンジンを持つため、知識ベースを作成すればいろいろな損傷モードについての診断が可能である。また、このESによる大型石油タンクの診断結果を示し、ある程度実際のタンクの診断にも適用できることを示した。

文献一覽

James T.R.Yao

1985 Safety and Reliability of Existing Structures : Pitman Publishing INC

消防庁

1964 「新潟地震火災に関する研究」

中久喜厚

1983 「石油タンクの地震被害について」
『火災』 第33巻 第3号

石塚満

1983 「建築物被害査定のエキスパートシステム」『情報処理学会論文誌』第24巻
第3号 pp. 357 - 363

Key Words (キー・ワード)

Expert system (エキスパートシステム), Knowledge base (知識ベース), Inference engine (推論エンジン), Diganosis tree (診断ツリー), Damage mode (損傷モード), Data base (データベース)

A Study of an Expert System for Earthquake Damage Estimation of Large Scale Oil Storage Tanks

Tomohiko Mitsumori* and Kohei Suzuki**

*Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

Comprehensive Urban Studies, No. 44, 1991, pp. 45~59

In the petro-chemical plants along the Japanese coast, especially in the Keihin district, large quantities of dangerous materials (petroleum, poisonous gas, etc.) are stored in gigantic tanks. In the event of a strong earthquake - which has been predicted for the near future - those facilities would be more or less damaged. Environmental safety would be jeopardized if the large quantities of oil flow out and the mixture of gases spreads into the air.

So far, various damage diagnosis methods for such facilities have been proposed to minimize seismic destruction, but most of them require either complex response calculations based on dynamic modeling or highly specialized techniques applied in earthquake proof design. For their intended users, the oil companies, these are by no means expedient and intelligible methods of diagnosis.

This research project aims at developing an expert system technique which diagnoses the damage to oil tanks during an actual destructive seismic event by means of a personal computer base. The input of seismic energy into the tank is inferred from the dominant frequency of seismic wave and ground characteristics, the size of tanks, etc. The knowledge base was developed from the damage mode obtained through accumulation and careful examination of data of past earthquake damage to flat-bottomed, cylindrical oil tanks, and the damage conditions and factors to damage. In this paper, we show our basic idea of an expert system method and some of its applications.